

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：31308

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390118

研究課題名(和文) 2軸加速度1軸角速度検出用圧電振動型センサの高性能化に関する研究

研究課題名(英文) Study on the High Performance of Piezoelectric Vibration Sensor for Detecting Two-Axis Acceleration and One-Axis Angular Velocity

研究代表者

菅原 澄夫 (Sugawara, Sumio)

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号：00007197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：自動車やロボットなどの移動物体の姿勢制御やナビゲーション用として、加速度と角速度の検出可能なMEMS構造に適した圧電振動型センサが要求されている。本研究で検討する振動型センサは、周波数変化型2軸加速度センサと1軸角速度センサを平面的に複合化させて一つのセンサとして構成されている。このため、このセンサでは両センサからの出力信号を干渉なしに独立に取り出せる特徴を持っている。特に、使用される加速度センサは、直角振動子が質量の重心位置にスパーサーを介して接合された非常に簡素な構造となっている。その結果、他軸感度が著しく低減されたセンサ特性が実現されている。

研究成果の概要(英文)：The piezoelectric vibration sensor suitable for a MEMS structure is required for application to the attitude control and navigation systems of moving objects such as vehicles or robots. As such a sensor, the new vibration sensor composed of the frequency-change-type two-axis acceleration sensor and the one-axis angular velocity sensor was proposed by the author. As the sensor can detect two output signals of acceleration and angular velocity individually, the interference between both signals is not observed and therefore signal-processing becomes quite easily.

In this study, the new two-axis acceleration sensor using a right-angled bending vibrator connected to the center of gravity of mass is proposed to reduce cross-axis sensitivity caused by rotation of mass of the sensor. The sensor characteristics with very small cross-axis sensitivity were realized and confirmed experimentally using the sample of trail production. The sensor is designed using the finite element analysis.

研究分野：電気電子工学、超音波エレクトロニクス

キーワード：振動型センサ 加速度センサ 角速度センサ 軸力 横振動子 周波数変化 直角横振動子 圧電振動

1. 研究開始当初の背景

自動車やロボットなどの移動物体の姿勢制御やナビゲーション用として、加速度と角速度の検出可能な MEMS 構造に適した圧電振動型センサが要求されている。

このようなセンサとして、一つの振動体を利用して加速度や角速度を検出させる構造が提案されている。しかし、微小な両信号を分離して検出させるための高価な信号処理回路を必要とし、振動体が一つであるため振動体にトラブルが発生すると、両信号が共に利用不可能になるなど、問題点もある。

また、このようなセンサとして、加速度と角速度を個別のセンサ製品を用いて、結果的に同様の動作をさせることも可能である。しかし、体積が大きくなると同時に、コストの面でもかなり不利になる。

このため、1個のセンサで加速度と角速度が検出でき、しかも両出力信号が複雑で高価な信号処理回路無しで独立して検出できる構成が必要と考えられる。これにより、センサにトラブルが発生した際に、何れか一方の信号が利用できる可能性があり、メリットにつながると思われる。

このような観点から、研究者は加速度センサと角速度センサを複合させたセンサ構造を実現して、一個のセンサでありながら加速度センサ部と角速度センサ部を有し、両信号を独立に取り出せる構成にすれば、両者の分離や干渉を無くすために必要とされる複雑な信号処理回路が不要となる。

このため、研究者がこれまで検討して来た周波数変化型 2 軸加速度センサと 1 軸角速度センサを平面的に配置して構成したセンサを提案し、その特性を実験的に検証して、設計の妥当性を明らかにしてきた。この圧電振動型センサにおいては、構成が多少複雑であること、さらに加速度により質量が僅か回転することに起因する他軸感度を有するなど、加速度センサ部に改良すべき点があった。そこで、さらに構造が簡素で質量回転が殆ど発生しない新しい MEMS 構造に適した新構成のセンサの考案が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究者がこれまで実施して来た 2 軸加速度及び 1 軸角速度を検出できる圧電振動型センサを改良して、より MEMS 構造に適した簡素な構成を有する特性の優れたセンサを実現することである。このセンサにおいては、特に加速度センサ部分の構造の簡素化及びセンサ特性の改良に主眼を置く必要がある。角速度センサ部については、その設計や特性については既に確立されているので、ここではその改良については対象としていない。

3. 研究の方法

本研究は、有限要素法(CyberNetSystem 社、Ansys 12.6)を用いてセンサ設計を行い、そ

の試作実験により、センサの設計法や特性の妥当性を検証した。

4. 研究成果

(1) 改良前の圧電振動型センサ

図 1 は研究者がこれまで検討して来た圧電振動型センサの構造で、2 軸加速度センサ部分と 1 軸角速度センサ部分から構成されている。加速度センサは 2 個の横振動子を y 軸から左右に 45° 回転させた位置に対称に配置して、それぞれの一端をフレームに固定させ他端に質量を付加させて、質量は 4 本の折り曲げ支持棒でフレームに支持固定されている。質量に加速度が印加されると、振動子の軸方向に軸力が作用して、振動子の共振周波数が変化するので、この変化から印加させた 2 軸方向の加速度を知ることができる。

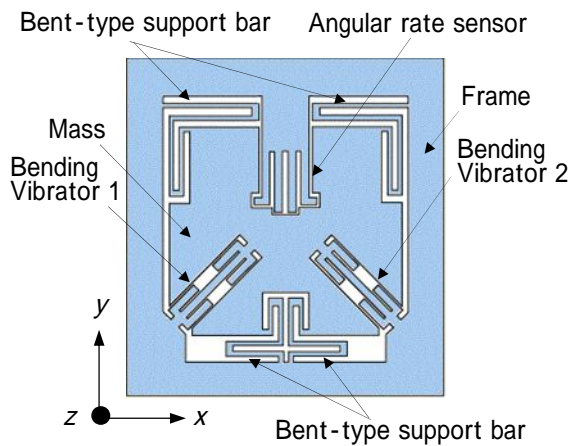
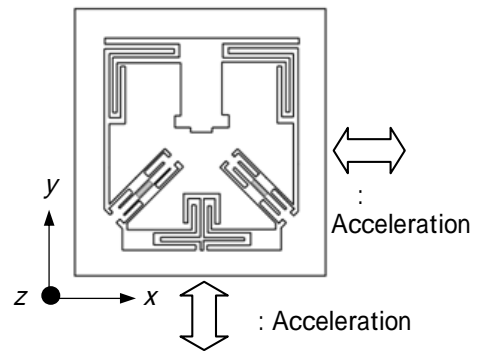
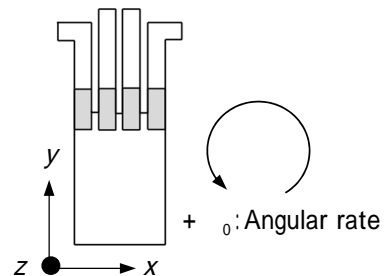


図 1 . 改良前の圧電振動センサ



(a) Part of acceleration sensor



(b) Part of angular velocity sensor

図 2 . 加速度及び角速度の検出部

なお、加速度センサの最大感度を得るため、このセンサをz軸回りに-45°回転させて使用する。

図2(a)が角速度センサ部を切り離れた周波数変化型2軸加速度センサの構造で、この構造をMEMS構造に更に適した構造にし、同時に質量が加速度で回転せずその印加方向に直線運動するようにした上で、他軸感度を可能な限り低減化するように改良する必要がある。また、同図(b)は角速度センサ部の4脚音さ振動子を用いた1軸角速度センサ(振動ジャイロ)を示しており、振動子面に垂直な軸回りの角速度を検出できる横置き型のセンサである。

(2) 本研究で考案した2軸加速度センサ

図3は改良した加速度センサの新構造で、これまでのように質量を切削して配置していた横振動子を2個接合させた直角横振動子に変更し、その接合部を対称構造の質量の中央部の重心位置にスペーサーを介して接合させたものである。このような構成では、2軸方向の加速度を印加させても、質量は各軸方向に直線運動をするので、質量の回転も発生せず他軸感度は非常に小さくなる。

図4はこの2軸加速度センサの特性で、図示のように原点を通る直線特性となっており、実験値は解析値とも良く対応しており、他軸感度も非常に小さくなっていることが確認された。

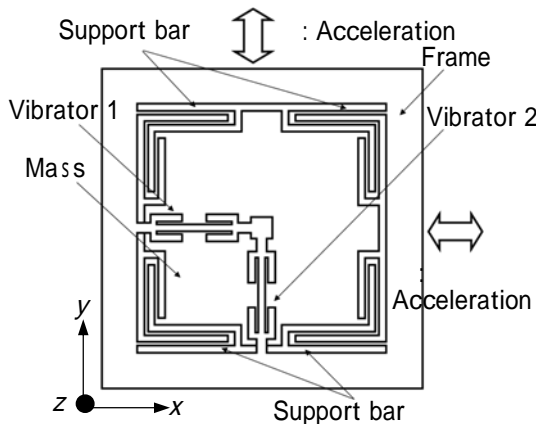
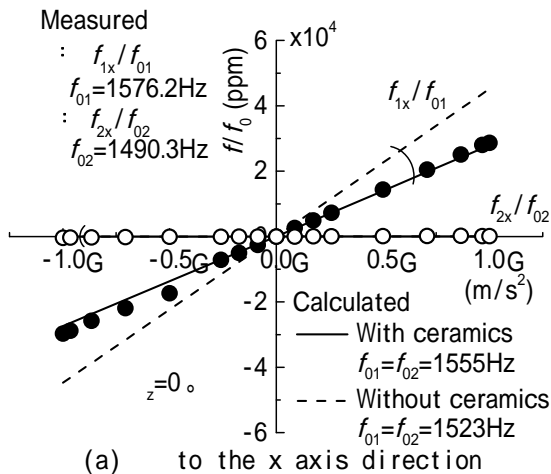
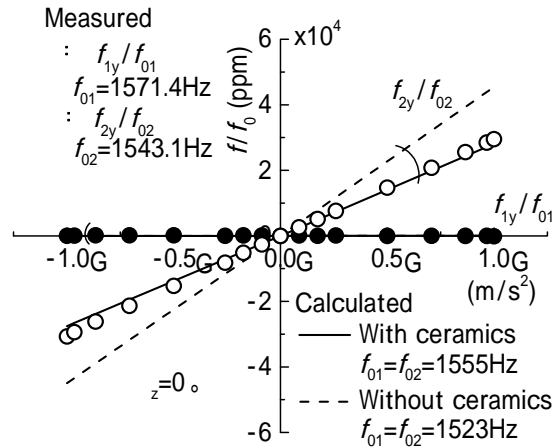


図3. 2軸加速度センサの新構造



(a) to the x axis direction

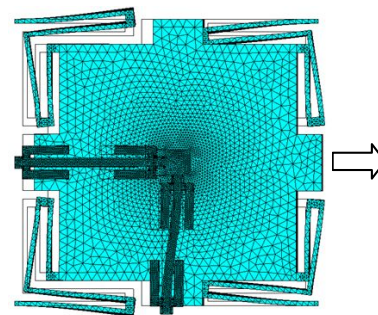


(b) to the y axis direction

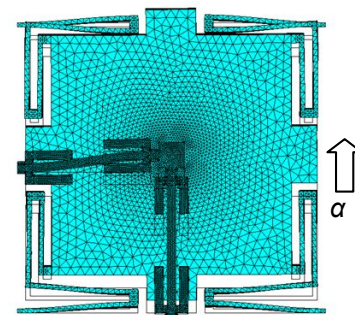
図4. 試作した2軸加速度センサの特性

図5は、加速度印加時の加速度センサの質量の運動を解析した結果で、質量は各軸方向へ直線運動していることが確認された。

一方、加速度センサに使用される横振動子は、その両端の振動変位が元々極小となるように設計されているが、2個直角に接合されるとその設計条件が僅か変化し、2個の振動子間で機械的結合現象を起こすので、注意が必要である。この結合現象を無くすには、質量を接合させた状態で、或いは駆動・検出用の圧電セラミックスを接着させた状態のまま、振動子両端部のサイドアーム長を多少調整することによって、機械的結合を低減化できる。図6はその例で、サイドアーム長 l_a を可変した場合の両振動子の中央アーム中央の振動方向であるz軸方向の変位比 u_{02}/u_{01} 及び u_{01}/u_{02} の関係を解析した結果である。こ



(a) to the x axis direction



(b) to the y axis direction

図5. 加速度センサの質量運動の解析結果

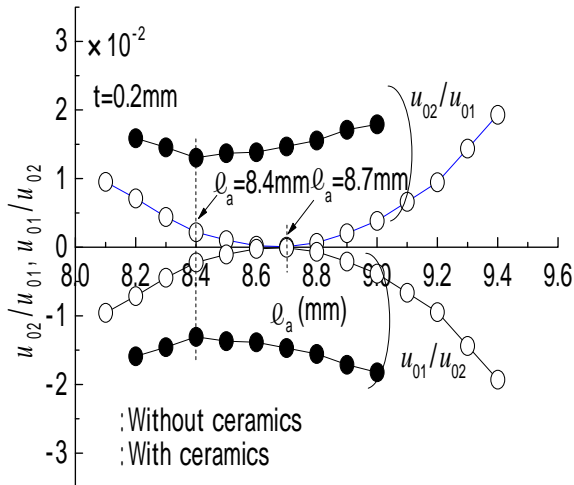
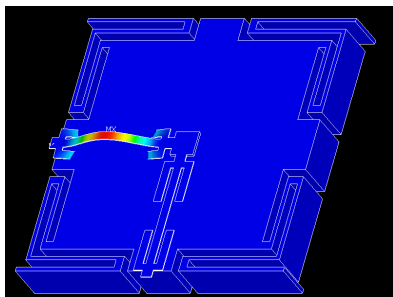


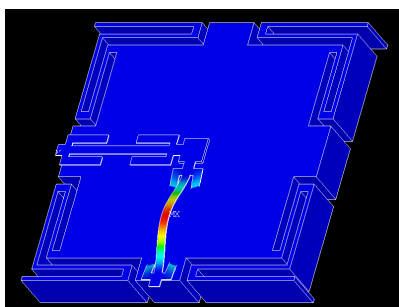
図 6 . サイドアーム長と変位比の関係

の結果より、変位比が最小になるアーム長が得られ、結合が極小となる条件になる。

このような調整を実施すると、図 7 のように片方の振動子を駆動した時に、他方は殆ど振動しないという状態が実現できる。すなわち、直角振動子を構成する 2 つの振動子を殆ど同じ周波数で独立に制御できることになる。



(a) Vibrator 1 (f_{01})

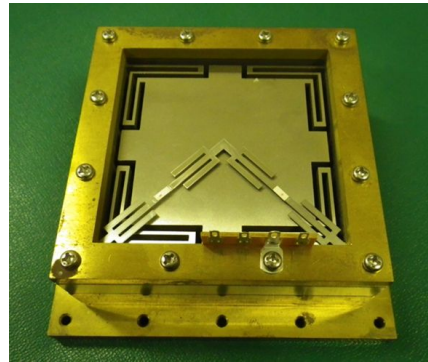


(b) Vibrator 2 (f_{02})

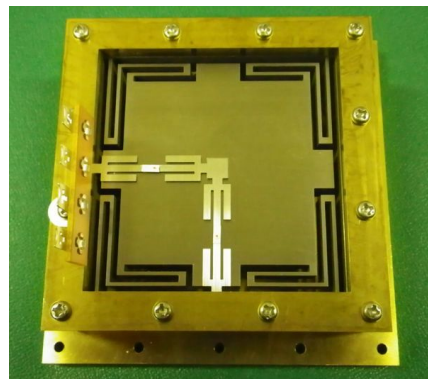
図 7 . 機械的結合が無い振動子の振動モード

図 8 は試作加速度センサの外観で、センサ本体はステンレススチール (SUS304) で製作されており、本体の体積は約 $90 \times 90 \times 10.2 \text{ mm}^3$ と実験が容易に実施できるように約 20 ~ 25 倍程度に拡大して製作されている。センサフレームは真鍮台にネジで固定されており、駆動は圧電セラミックス (パナソニック製、PCM-88 材) を接着して、重力場で回転台によ

り印加する加速度を変化させて、センサのインピーダンス測定により、共振周波数の変化を測定した。



(a)



(b)

図 8 . 試作加速度センサの外観

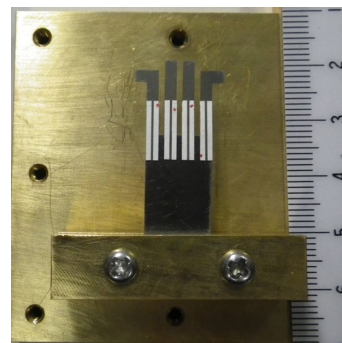


図 9 . 試作角速度センサの外観

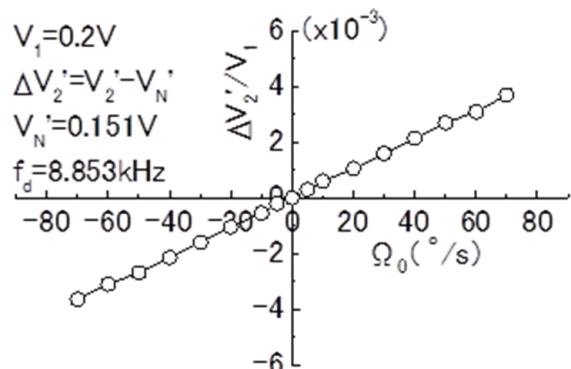


図 10 . 角速度センサの実測特性例

また、角速度センサは加速度センサと同一

材料からエッチングで形成されており、その駆動・検出は同様に圧電セラミックスの接着により実施される。図9はその試作センサの外観で、図10はセンサ特性の実測結果の一例である。

(3) 本研究で考案した圧電振動型センサ

図11は、以上のような加速度センサと角速度センサを複合化させて1個のセンサとして構成した圧電振動型センサである。なお、空いているスペースに別の角速度センサをさらに追加配置させることもできる。

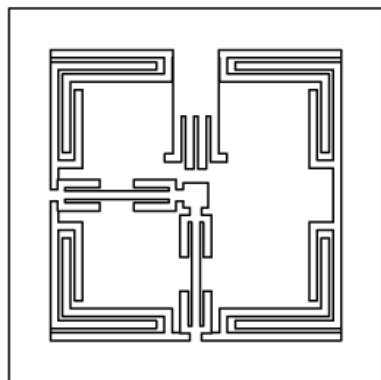


図11. 圧電振動センサの新構造

本研究については、実験の容易さと予算の関係上、金属製センサ構成を用いて最優先のセンサ特性の詳細な検討や設計法の確立を行っており、MEMSセンサの実現については計画変更して中止にしている。実施計画内容については、ほぼ遂行できたと考えている。今後、研究成果については、雑誌論文で順次公表して行きたい。

<引用文献>

Sumio Sugawara, Hiroyuki Suzuki and Takashi Saito, Construction of Frequency-Change-Type Single-Crystal Silicon Two-Axis Acceleration Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 7B, 2007, 4652-4655.

Sumio Sugawara, Tokiharu Watanabe and Jiro Terada, Application of Frequency-Change-Type Single-Crystal Silicon Acceleration Sensors to Inclination Angle Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 5, 2008, 4048-4051.

Sumio Sugawara and Junpei Koike, Theoretical Studies of Realizing High Sensitivity for Frequency-Change-Type Single-Crystal Silicon Two-Axis Acceleration Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 8, 2008, 6578-6582

Sumio Sugawara and Yu Kajiwara, Finite-Element Analysis and Experimental Study of Frequency-Change-Type Acceleration Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49,

No. 7S, 2010, 07HD02-1~6

Sumio Sugawara and Yu Kajiwara, Improvement of Characteristics of Frequency-Change-Type Two-Axis Acceleration Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, 2012, 07GC06-1~6.

Sumio Sugawara and Ryota Sato, Study of Composite-Type Vibration Sensor for Detection of Two-Axis Acceleration and One-Axis Angular Velocity, Proc. of Symp. on Ultrason. Electron., Vol. 36, No.2P3-3, 2015, 1-2.

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 6件)

Sumio Sugawara and Yuji Sato, New Structure of Frequency-Change-Type Two-Axis Acceleration Sensor, Proc. of Symp. on Ultrason. Electron., Without peer review, Vol. 36, No.2P3-5, 2015, pp.1-2. ISSN 1348-8236.

Sumio Sugawara and Ryota Sato, Study of Composite-Type Vibration Sensor for Detection of Two-Axis Acceleration and One-Axis Angular Velocity, Proc. of Symp. on Ultrason. Electron., Without peer review, Vol. 36, No.2P3-3, 2015, pp.1-2. ISSN 1348-8236.

菅原 澄夫、圧電型横振動子の設計とその各種センサへの応用(招待講演)、日本音響学会2015年度春季研究発表会、査読無、No. 2-9-5, 2015, pp. 1-4.

Sumio Sugawara, Kohei Omori and Kyohei Takahashi, New Construction of Frequency-Change-Type Two-Axis Acceleration Sensor, Proc. of Symp. on Ultrason. Electron., Without peer review, Vol.35, No. 2P3-2, 2014, pp. 273-274. ISSN 1348-8236.

Sumio Sugawara and Toshitaka Gono, Construction of Vibration Sensor for Detection of Two-Axis Acceleration and One-Axis Angular Rate, Proc. of Symp. on Ultrason. Electron., Without peer review, Vol. 35, No. 2P3-1, 2014, pp. 271-272. ISSN 1348-8236.

Sumio Sugawara, Yousuke Satou and Kyouhei Takahashi, Construction of Frequency-Change-Type Two-Axis Acceleration Sensor, Proc. of Symp. on Ultrason. Electron., Without peer review, Vol. 34, No. 1P3-16, 2013, pp. 161-162. ISSN 1348-8236.

6. 研究組織

(1)研究代表者

菅原 澄夫 (Sugawara, Sumio)

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号: 00007197